

Anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági moduluszának meghatározása – kőris (*Fraxinus excelsior*) és lucfenyő (*Picea abies*) faanyagokon végzett kísérletek bemutatása*

KARÁCSONYI ZSOLT¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar, Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet

Kivonat

A nyíró-rugalmassági modulusz az egyik fontos rugalmas anyagállandó. A Young-modulusz és a Poisson-tényező mellett a G-modulusz a harmadik rugalmas technikai állandó, amely meghatározza a merevségi és alakíthatósági tenzort.

A rugalmas állandók ismeretében meghatározott, fenti tenzorok segítségével számíthatjuk a feszültségi állapot alapján az alakváltozási állapotot vagy fordítva. A nyíró-rugalmassági modulusz pontos értékét azonban nem könnyű meghatározni, mérni. Ennek oka, hogy egy előre kiválasztott keresztmetszetben tiszta nyírást kísérleti körülmények között nehéz létrehozni. Ezen kívül a szögváltozás nagyságának meghatározása is a bonyolultabb alakváltozás-mérési feladatok közé tartozik. Ezek a nehézségek azzal a következménnyel jártak, hogy napjainkra több technológiát is kidolgoztak a nyíró-rugalmassági modulusz mérésére. Ezek többsége továbbra is tartalmaz valamilyen elméleti és/vagy mérés technikai problémát.

Anizotrop anyagoknál – mint amilyen a faanyag is – lehetőség nyílik a nyíró-rugalmassági modulusz közvetett mérésére. E módszerrel a megfelelően orientált rúd alakú próbatestet tiszta húzásnak vagy nyomásnak vetjük alá és mérjük a hossz- és keresztirányú fajlagos méretváltozásokat. Ez a közvetett technológia egyszerű és pontos.

Kulcsszavak: nyíró-rugalmassági modulusz, anizotrop anyagok, alakváltozás meghatározás optikai eszközzel, orientációs elmélet

Determination of the shear modulus of anisotropic materials - experiments on common ash (*Fraxinus excelsior*) and spruce (*Picea abies*)

Abstract

Shear modulus is one of the important material properties. It is the third elasticity constant next to the Young modulus and the Poisson constant defining the rigidity and elasticity tensor.

Based on the above tensors defined using the elasticity constants, the deformation state can be calculated from the stress state and vice versa. Determination and measurement of the shear modulus is rather difficult, however. The reason is that a clear shear state in a chosen section can

*A kutatás a Talentum – Hallgatói tehetséggondozás komplex feltételrendszerének fejlesztése a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-10/1-2010-0018 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

This research was supported by the European Union and co-financed by the European Social Fund in frame of the project „Talentum - Development of the complex condition framework for nursing talented students at the University of West Hungary”, project ID: TÁMOP 4.2.2.B-10/1-2010-0018

hardly be generated in laboratory conditions. Besides, determination of the angle alteration is also difficult. As a consequence, several methods are available for the measurement of the shear modulus, nowadays, however most of these techniques hold some theoretical and/or measurement controversy.

In case of anisotropic materials like wood, shear modulus can be measured indirectly. During this method, adequately oriented cylindrical samples are subjected to clear tension or compression while longitudinal and transversal specific dimension changes are measured. This indirect method is simple and accurate.

Key words: shear modulus, anisotropic materials, deformation measured with optical equipment, orientation theory

Bevezetés

A gyakorlati életben a faanyag nyíró-rugalmassági modulusának az ismerete azért fontos, mert a hajlított fa tartók alakváltozásának mintegy 15%-a a nyírásból származik, szemben az acél tartókkal, ahol csupán 2% a nyírásból származó lehajlás. A pontos elmozdulás meghatározásához ismerni kell a faanyag G-modulusát. Az izotrop anyagokat egy rugalmassági modulus jellemzi. Az anizotrop anyagoknál azonban más a helyzet. Elvileg minden síkhoz más nyíró-rugalmassági modulus tartozik. Az ortogonálisan anizotrop faanyag esetén bizonyítható, hogy amennyiben ismerjük a három anatómiai fősíkhoz tartozó G-modulust, akkor bármely, tetszőleges síkhoz elméletileg kiszámíthatjuk az anyagállandót.

Az orientációs elmélet bemutatása anizotrop anyagok nyíró-rugalmassági modulusának a meghatározására

Egy anizotrop anyagból kialakított próbatestről azt a feltételezést tesszük, hogy legalább egy 2-fogású forgatótengellyel rendelkezik. Ha egy ilyen mintadarabot húzó- vagy nyomóerővel terhelünk, akkor a terheléstől kellő távolságra, a próbatest középső kétharmadában csak normál igénybevétel lép fel. Ebben az esetben az általános Hooke-törvény a következő alakban írható fel:

$$\begin{matrix} \varepsilon_{1'1'} \\ \varepsilon_{2'2'} \\ \varepsilon_{3'3'} \\ 2 \cdot \varepsilon_{2'3'} \\ 2 \cdot \varepsilon_{1'3'} \\ 2 \cdot \varepsilon_{1'2'} \end{matrix} = \begin{bmatrix} s_{1'1'1'1'} & s_{1'1'2'2'} & s_{1'1'3'3'} & 0 & 0 & 2 \cdot s_{1'1'1'2'} \\ s_{2'2'1'1'} & s_{2'2'2'2'} & s_{2'2'3'3'} & 0 & 0 & 2 \cdot s_{2'2'1'2'} \\ s_{3'3'1'1'} & s_{3'3'2'2'} & s_{3'3'3'3'} & 0 & 0 & 2 \cdot s_{3'3'1'2'} \\ 0 & 0 & 0 & 4 \cdot s_{2'3'2'3'} & 4 \cdot s_{2'3'3'1'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \cdot s_{3'1'2'3'} & 4 \cdot s_{3'1'3'1'} & 0 \\ 2 \cdot s_{1'2'1'1'} & 2 \cdot s_{1'2'2'2'} & 2 \cdot s_{1'2'3'3'} & 0 & 0 & 4 \cdot s_{1'2'1'2'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma^{1'1'} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [1]$$

Az [1] mátrixegyenletet kifejezve a következő egyenletrendszert kapjuk:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1'1'} &= s_{1'1'1'1'} \cdot \sigma^{1'1'} \\ \varepsilon_{2'2'} &= s_{2'2'1'1'} \cdot \sigma^{1'1'} \\ \varepsilon_{3'3'} &= s_{3'3'1'1'} \cdot \sigma^{1'1'} \\ \varepsilon_{2'3'} &= 0 \cdot \sigma^{1'1'} \\ \varepsilon_{1'3'} &= 0 \cdot \sigma^{1'1'} \\ \varepsilon_{1'2'} &= s_{1'2'1'1'} \cdot \sigma^{1'1'} \end{aligned} \quad [2]$$

ahol,

$\varepsilon_{ij'}$ - az alakváltozási állapot tenzora a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$),

$\sigma_{ij'}$ - a feszültségi állapot tenzora a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$),

$s_{ij'kl'}$ - alakíthatósági anyagtenzor a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$).

Az 1. ábrának megfelelően az anizotrop anyag Hooke-törvényét a vesszős koordináta-rendszer szerint írjuk fel. Ugyanezen az ábrán feltüntettünk egy vesszőtlen koordináta-rendszert is. Látható, hogy a próbatestet ebben az esetben a 3-as jelű tengely körül forgattuk el α szöggel. Ez a 2-fogású forgatótengely. Amennyiben az 1. ábrán bemutatott mérést a vesszőtlen koordináta-rendszerben kialakított próbatesten végezzük el, akkor a (2) mátrixegyenletek a következők szerint alakulnak:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{11} &= s_{1111} \cdot \sigma^{11} \\
\varepsilon_{22} &= s_{2211} \cdot \sigma^{11} \\
\varepsilon_{33} &= s_{3311} \cdot \sigma^{11} \\
\varepsilon_{23} &= 0 \cdot \sigma^{11} \\
\varepsilon_{31} &= 0 \cdot \sigma^{11} \\
\varepsilon_{12} &= s_{1211} \cdot \sigma^{11}
\end{aligned}
\tag{3}$$

ahol,

ε_{ij} - az alakváltozási állapot tenzora a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$),

σ_{ij} - a feszültségi állapot tenzora a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$),

s_{ijkl} - alakíthatósági anyagtenzor a vesszős koordináta-rendszerben ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$).

A [3] és [2] egyenletekben szereplő s_{ijkl} és $s_{i'j'k'l'}$ alakíthatósági tenzor-elemek ugyanazon anyag anyagjellemzői. Értékük nem megegyező a kettő, egymáshoz viszonyítva α szöggel elforgatott derékszögű koordináta-rendszerben, hiszen az alakváltozások jelentősen eltérhetnek a különböző irányokban. Azonban az már nem igaz, hogy az anyagtulajdonságok is megváltoznak a koordináta-rendszer elforgatása után. Ezért az s_{ijkl} és $s_{i'j'k'l'}$ tenzor-elemek között szoros kapcsolatnak kell fennállnia. A két különböző koordináta-rendszer között valamilyen kapcsolatnak kell fennállnia annak érdekében, hogy az egyes tulajdonságvektor komponenseit az egyik rendszertől a másikba átszámolhassuk. Négy ndimenziós tenzor esetében a következő szabály érvényes:

$$t_{i'j'k'l'} = t_{ijkl} \cdot \beta_{i'}^i \cdot \beta_{j'}^j \cdot \beta_{k'}^k \cdot \beta_{l'}^l \tag{4}$$

ahol,

$t_{i'j'k'l'}$ ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$) a tulajdonságkomponens skalár értéke a vesszős koordináta-rendszerben,

t_{ijkl} ($i, j, k, l = 1, 2, 3$) a tulajdonságkomponens skalár értéke a vesszőtlen koordináta-rendszerben,

$\beta_{i'}^i, \beta_{j'}^j, \beta_{k'}^k, \beta_{l'}^l$ - iránykoszinuszok a vesszős és a vesszőtlen koordináta-rendszerek között.

A koordinátarendszer-forgatásnak megfelelően a transzformációs mátrix elemei a következő táblázatban kerültek összefoglalásra:

1. táblázat $\beta_{i'}^i$ ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$; $i, j, k, l = 1, 2, 3$) iránykoszinuszok megadása az 1. ábra koordináta-rendszere esetében

Table 1 $\beta_{i'}^i$ ($i', j', k', l' = 1', 2', 3'$; $i, j, k, l = 1, 2, 3$) direction cosine in the coordinate system of Figure 1

	1	2	3
1'	$\beta_{1'}^1 = \cos \alpha$	$\beta_{1'}^2 = -\sin \alpha$	$\beta_{1'}^3 = 0$
2'	$\beta_{2'}^1 = \sin \alpha$	$\beta_{2'}^2 = \cos \alpha$	$\beta_{2'}^3 = 0$
3'	$\beta_{3'}^1 = 0$	$\beta_{3'}^2 = 0$	$\beta_{3'}^3 = 1$

A [4] transzformációs összefüggést a [2] egyenletekben szereplő alakíthatósági tenzorelemekre alkalmazzuk, majd a vesszőtlen koordináta-rendszer alakíthatósági tenzorelemeit kifejezzük a technikai rugalmas állandókkal. A következő hat egyenlőséget kapjuk:

$$\frac{\varepsilon_{1'1'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{1'1'1'1'} = \frac{1}{E_1} \cdot \cos^4 \alpha + \frac{1}{E_2} \cdot \sin^4 \alpha - 2 \cdot \frac{\nu_{21}}{E_2} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{G_{12}} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha \tag{5}$$

$$\frac{\varepsilon_{2'2'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{2'2'1'1'} = \frac{1}{E_1} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{E_2} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha - \frac{\nu_{21}}{E_2} \cdot (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) - \frac{1}{G_{12}} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha \tag{6}$$

$$\frac{\varepsilon_{3'3'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{3'3'1'1'} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \cdot \sin^2 \alpha - \frac{\nu_{13}}{E_1} \cdot \cos^2 \alpha \tag{7}$$

$$\frac{\varepsilon_{2'3'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{2'3'1'1'} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\varepsilon_{3'1'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{3'1'1'1'} = 0 \tag{9}$$



$$\frac{\varepsilon_{1'2'}}{\sigma^{1'1'}} = s_{1'2'1'1'} = \frac{1}{E_2} \cdot \cos \alpha \cdot \sin^3 \alpha - \frac{1}{E_1} \cdot \cos^3 \alpha \cdot \sin \alpha - \frac{\nu_{21}}{E_2} \cdot (\cos^3 \alpha \cdot \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \sin^3 \alpha) + \frac{1}{2 \cdot G_{12}} \cdot (\cos^3 \alpha \cdot \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \sin^3 \alpha) \quad [10]$$

Az [5], [6] és [10] egyenletek egy három egyenletből álló három-ismeretlenes egyenletrendszert alkotnak. Az egyik ismeretlen az 1,2 síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági modulusz. Azaz az egyenletrendszert G_{12} -re kell megoldanunk. Először képezzük az [5] és [6] egyenletek különbségét:

$$\frac{\varepsilon_{1'1'} - \varepsilon_{2'2'}}{\sigma^{1'1'}} = \frac{4 \cdot \cos^4 \alpha - \sin^2 2\alpha}{4 \cdot E_1} + \frac{4 \cdot \sin^4 \alpha - \sin^2 2\alpha}{4 \cdot E_2} + \frac{\sin^2 2\alpha}{2 \cdot G_{12}} + \nu_{21} \cdot \frac{(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)^2}{E_2} \quad [11]$$

majd a [10] egyenletből kifejezem ν_{21} -t:

$$\nu_{21} = \frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} - \frac{E_2 \cdot \cos^2 \alpha}{E_1 \cdot (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)} + \frac{E_2}{2 \cdot G_{12}} - \frac{E_2 \cdot \varepsilon_{1'2'}}{\sigma^{1'1'} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)} \quad [12]$$

$$G_{12} = \frac{\sigma^{1'1'} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot (\varepsilon_{1'1'} - \varepsilon_{2'2'}) + 2 \cdot \varepsilon_{1'2'} \cdot \cos 2\alpha} \quad [13]$$

$$\varepsilon_{1'2'} = \varepsilon_{45} - \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{1'1'} + \varepsilon_{2'2'}) \quad [14]$$

és

$$G_{12} = \frac{\sigma^{1'1'} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot (\varepsilon_{1'1'} - \varepsilon_{2'2'}) + 2 \cdot \left[\varepsilon_{45} - \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{1'1'} + \varepsilon_{2'2'}) \right] \cdot \cos 2\alpha} \quad [15]$$

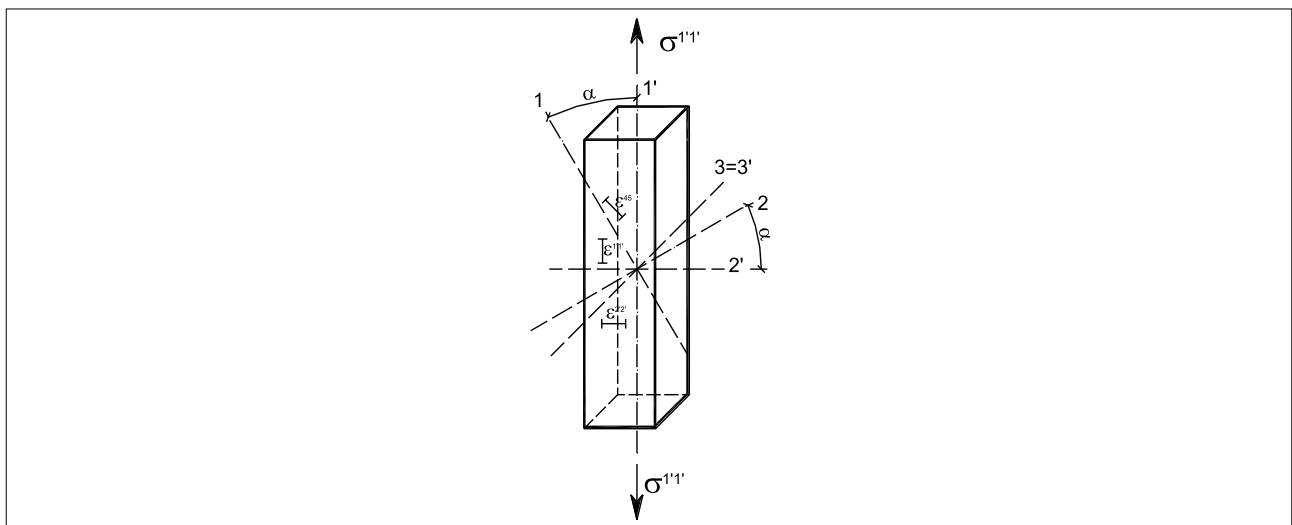
Amennyiben a vesszőtlen derékszögű koordináta-rendszer három irányáról azt feltételezzük, hogy azok egybeesnek a faanyag anatómia főirányaival (L-rost, R-sugar, T-húr), akkor elvégezhetjük az $i, j, k = L, R, T$ behelyettesítést. Így a [15] egyenlet értelmében a faanyag anatómiai fősíkjaihoz tartozó nyíró-rugalmassági modulusz értékeit határozhatjuk meg nyomó vagy húzó terheléssel és háromirányú alakváltozás-méréssel.

Ha a faanyagból kialakított próbatest orientációját oly módon választjuk meg, hogy valamelyik második anatómiai főirány (az egyik anatómiai főirány a forgatótengely) egybeesik a 45° -os alakváltozás-mérés irányával, az tovább egyszerűsíti a [15] összefüggést. Ebben az esetben ugyanis az $\alpha=45^\circ$ behelyettesítést kell elvégezzük:

$$G_{ij} = \frac{\sigma^{ii}}{2 \cdot (\varepsilon_{ii} - \varepsilon_{jj})} \quad [16]$$

ahol,

$i', j' = 1', 2', 3', i, j = 1, 2, 3$ és $1 = L; 2 = R; 3 = T$



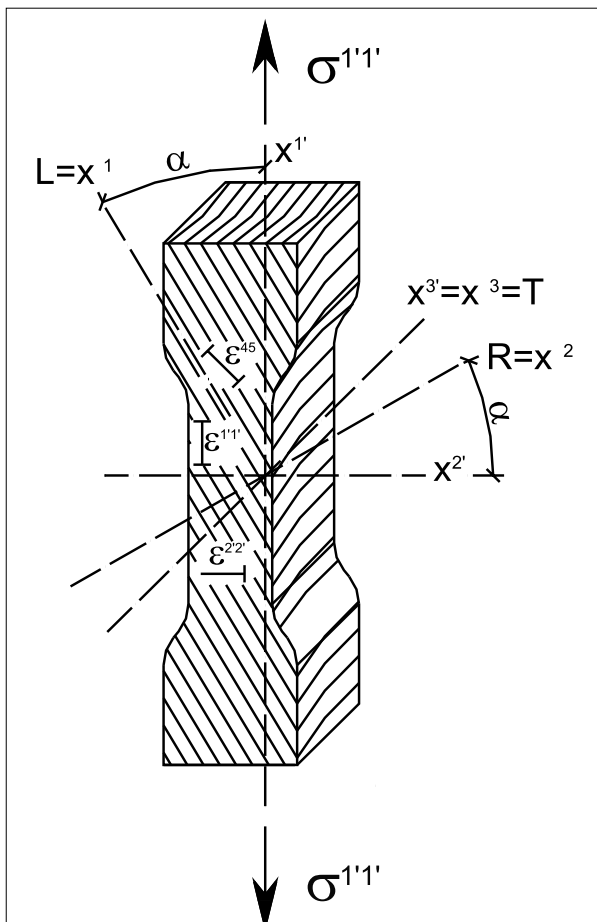
1. ábra Próbatest kialakítás anizotrop anyag nyíró-rugalmassági moduluszának a meghatározásához

Figure 1 Anisotropic specimen for determining the shear modulus

Anyagok, módszerek és eredmények

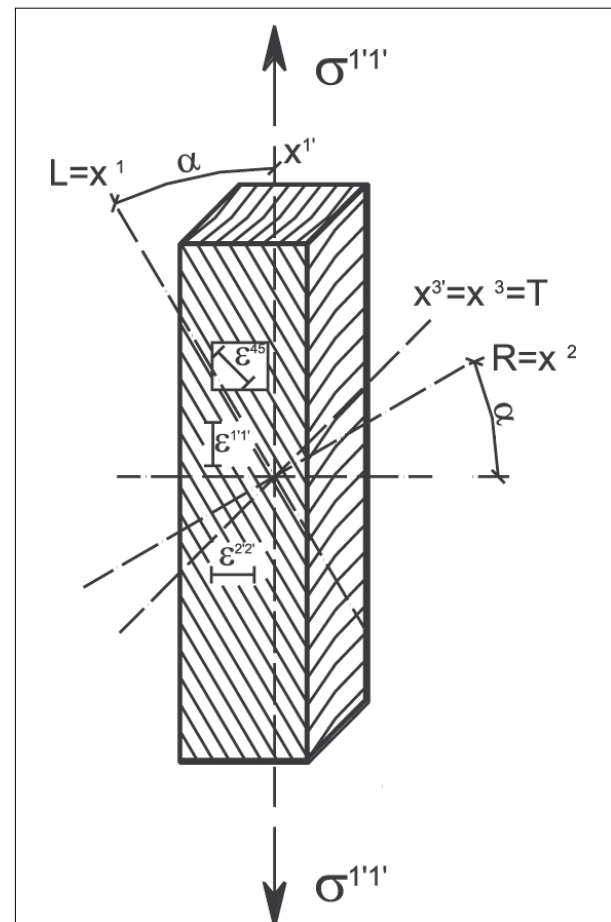
Fenyő (*Picea Abies*) faanyagból összesen 97 darab, húzó próbatestet (2. ábra) alakítottunk ki az L-R anatómiai fősíkhöz tartozó nyíró-rugalmassági modulus meghatározásához. Először Svájcban, az ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) Zürich laboratóriumában. Ezúttal is köszönetemet fejezem ki Prof. Peter Niemznek és a Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet doktoranduszának, Garab Józsefnek. Prof. Niemz engedélyt adott arra, hogy az itthon elkészített és kiküldött próbatestünket a zürichi intézetben rendelkezésre álló technikával is megvizsgálhassuk. A próbatestek keresztmetszete 20x20 mm, közepén 14x20 mm-re kigyengítve, hosszuk 200 mm. A terhelő erőt egy ZWICK univerzális terhelő-berendezés biztosította, míg a kétirányú alakváltozás méréséhez a DIC-2D optikai rendszert alkalmaztuk (4. ábra). A méréseket roncsolásmentes módon, a tönkremeneteli határ alatt végeztük el, lehetőséget biztosítva ezzel a soproni mérésekre. Ugyanezen próbatesteket idehaza is alávettük a húzó vizsgálatoknak. A terhelő erőt az FPZ-100 anyagvizsgáló berendezés biztosította, az alakváltozás méréséhez az ME-46 videoextenzométert használtuk (4. ábra).

Kőris (*Fraxinus Excelsior*) faanyagból alakítottunk ki összesen 175 db húzó (2. ábra) és nyomó (3. ábra) próbatestet. A próbatestek keresztmetszete 20x20 mm, közepén 6x20 mm-re kigyengítve, hosszuk 150 mm. Az elméleti háttér helyességének igazolására a normálfeszültséget nem csak húzó, hanem nyomó igénybevétellel is létrehoztuk, hiszen a mérés – az elmélet szerint – mindkét igénybevételre működik. Ugyanazon mintadarrából, egymás mellől került kivágásra húzó és nyomó próbatest. Mivel az infrastrukturális háttér csak kétirányú alakváltozás-mérést tett lehetővé, ezért a próbatesteket 45°-os orientációval alakítottuk ki. A mérésekhez a terhelő erőt az FPZ-100 anyagvizsgáló berendezés biztosította. Az alakváltozás mérésre egy optikai berendezést, az ME-46 videoextenzométert használtuk (5. ábra).



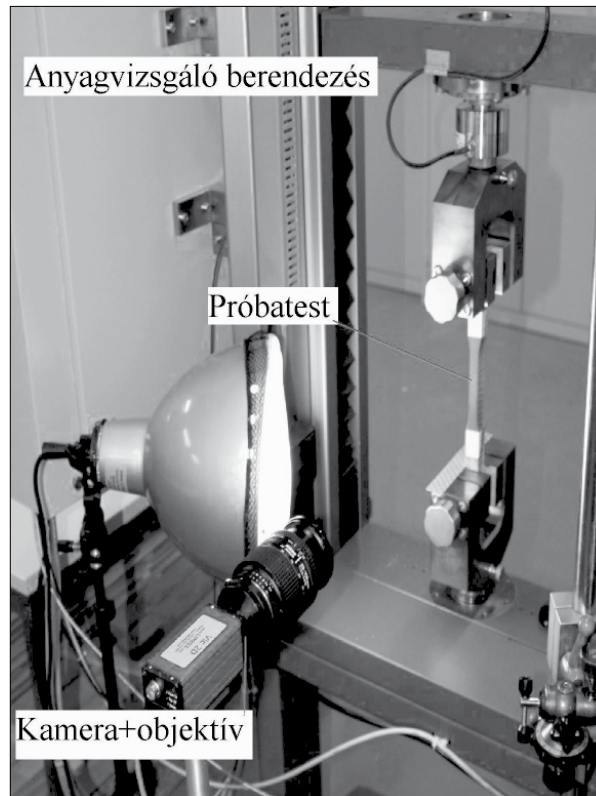
2. ábra Húzó-próbatest kialakítás faanyag nyíró-rugalmassági modulusának a meghatározásához

Figure 2 Tensile specimen for determining the shear modulus of wood



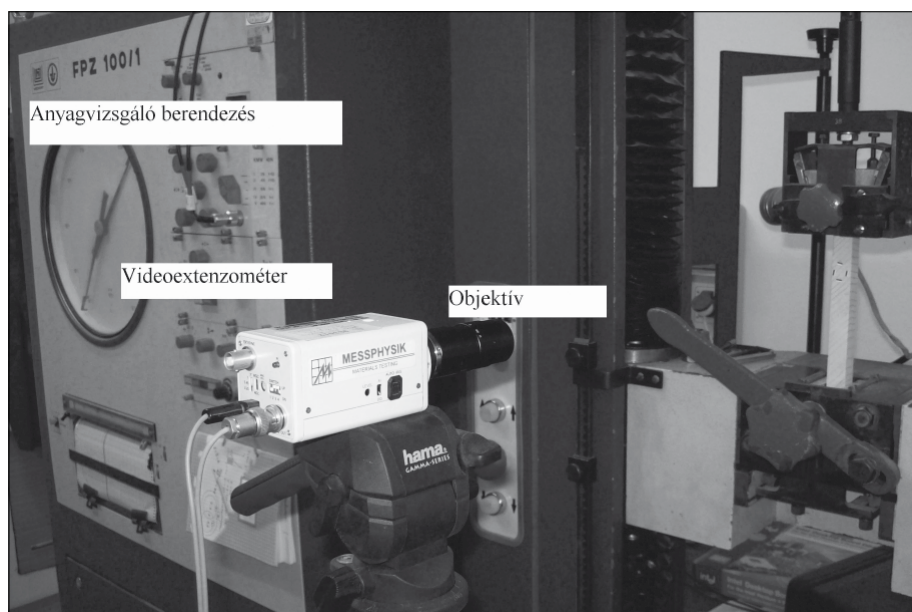
3. ábra Nyomó-próbatest kialakítás faanyag nyíró-rugalmassági modulusának a meghatározásához

Figure 3 Compression specimen for determining the shear modulus of wood



4. ábra A DIC-2D kamera az objektívvel, a próbatest és az anyagvizsgáló berendezés

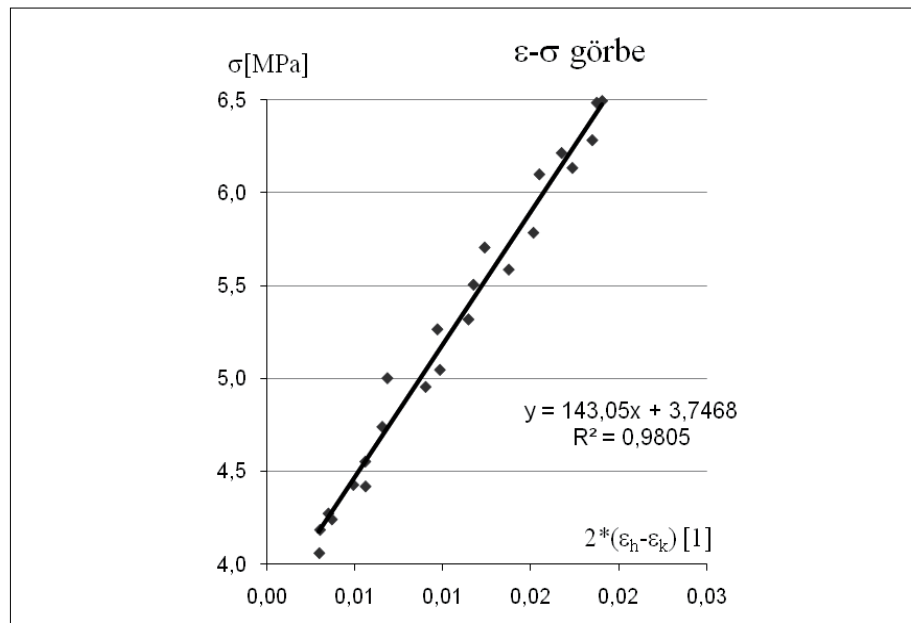
Figure 4 DIC-2D camera with objective, the specimen and the universal testing machine



5. ábra A videoextenzométer az objektívvel, a próbatest és az anyagvizsgáló berendezés

Figure 5 Videoextensometer with objective, the specimen and the universal testing machine

Az adatok kiértékelését mindkét esetben táblázatkezelő segítségével végeztük el. A terhelő erő és az alakváltozások adatait is a videoextenzométerhez tartozó szoftver rögzítette, a próbatest keresztmetszetét a mérést megelőzően mértük meg tolómérővel. A fellépő feszültséget az egyes mérési pontokhoz tartozó terhelő erő és a keresztmetszet ismeretében számítottuk ki. A terhelés irányával párhuzamos és arra merőleges fajlagos alakváltozás értékét a videoextenzométer adatai alapján határoztam meg. Ezen adatok alapján alakváltozás-feszültség görbéket szerkesztettem a táblázatkezelőben (6. ábra). A kapott pontthalmazra nem minden esetben



6. ábra Alakváltozás feszültség görbe a leszűkített adathalmazon

Figure 6 Deformation-stress diagram on limited mass of data

2. táblázat A lucfenyő L-R síkhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszának összefoglaló táblázata

Table 2 Shear modulus of spruce in the L-R anatomical plane

	DIC-2D	Videoeextenzométer
	(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 0,37 \text{ g/cm}^3$)	
Próbateszt-szám [db]	97	
Értékelések száma [db]	94	76
Átlagos sűrűség [g/cm ³]	0,37	
Átlag [Mpa]	519,7	410,7
Szórás [Mpa]	55,05	216,60
Max. [Mpa]	764,40	944,30
Min. [Mpa]	443,70	101,40
CV [%]	10,59	52,73
Átlagos R ² [1]	0,995	0,835

3. táblázat Mérési eredmények összefoglalása kőris nyíró-rugalmassági moduluszára

Table 3 Summary of the measured shear-modulus values of common ash

	G _{RT} [MPa]		G _{LR} [MPa]		G _{LT} [MPa]	
	húzás	nyomás	húzás	nyomás	húzás	nyomás
	(u=12%, $\rho_{\text{átlagos}} = 0,67 \text{ g/cm}^3$)					
Próbateszt-szám [db]:	35	28	28	28	26	30
Értékelések száma [db]:	33	28	27	28	24	30
Átlagos sűrűség [g/cm ³]:	0,67		0,67		0,67	
Átlag [MPa]:	284,0	310,7	1116,6	921,1	806,6	1042,7
Átlag (húzás-nyomás)[MPa]:	297,35		1018,85		924,65	
Szórás [MPa]:	63,6	66,7	333,6	166,8	241,4	189,0
Max [MPa]:	418,5	551,2	2007	1181	1531	1456
Min [MPa]:	165,8	217,7	461,6	413,3	511,7	723,5
CV [%]:	22,4	21,5	29,9	18,1	29,9	18,1
Átlagos R ² [1]:	0,911	0,980	0,876	0,978	0,865	0,986

lehetett megfelelő módon egyenest illeszteni, ezért az ilyen esetekben az adathalmazt leszűkítettük. Az így felvett egyenes meredeksége adta meg az adott anatómia fősíki nyíró-rugalmassági modulusát.

A fenyő próbatestek esetében a svájci mérések kiértékelése során csupán 3 adatsort kellett figyelmen kívül hagyni mérési hiba miatt, míg a hazai, videoextenzométeres mérések során már 21 mérés adott értékelhetetlen eredményt. A mérési tapasztalatok hiánya a hazai infrastruktúrával (FPZ-100 és ME-46) és annak esetleges hibái jól tükröződnek a statisztikai eredményekben (2. táblázat). A szórás és a variációs együttható (CV) nagyon magas, illetve a kiértékelés során a pontthalmazra illesztett egyenesek R^2 száma alacsony.

Kőris faanyag esetében (3. táblázat) az RT anatómiai fősíkhöz tartozó nyíró-rugalmassági modulus meghatározása során 35 húzó próbatestet mértünk, amiből 33 adott értékelhető eredményt – mérési hibára hivatkozva két eredmény nem volt megfelelő. A 28 nyomó próbatest mindegyik kiértékelhető volt. Az LR sík esetén 28 húzó próbatestből 27 volt megfelelő, míg mind a 28 nyomó próbatestet fel lehetett használni a statisztika készítéséhez. LT sík esetén két darab húzó próbatestet kellett kiejteni, míg a nyomó próbatestek itt is mind megfelelő eredményt adtak. A 2. táblázatban mutatjuk be a mérés adatait és az elkészített statisztikát. Az első két sorban a lemért próbatestek száma, illetve az értékelések száma szerepel. A statisztikai adatok az értékelt próbatestek számából származnak. A próbatestek átlagos sűrűsége tömeg- és térfogatmérés alapján történt. A következő sorban az átlagos nyíró rugalmassági modulus értékeit tüntettük fel. A következőkben a szórás szerepel, illetve a mintának a minimum és maximum értékei. A szórás százalékos aránya az átlaghoz viszonyítva, azaz a relatív hiba a következő feltüntetett adat. Végül pedig a mérési pontokra illesztett egyenesek R -négyzetének az átlaga szerepel.

Az eredmények alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy az orientációs elmélet alkalmas a nyíró-rugalmassági modulus megbízható, egyéb külső tényezőktől független meghatározására. Ugyanakkor a módszer további alkalmazása előtt célszerű lenne még vizsgálatokat végezni – akár a háromparaméteres modell és más anizotrop anyagok, kompozit termékek alkalmazásával. Ehhez a megfelelő alakváltozás-mérő rendszer rendelkezésre állása is szükséges.

Hivatkozások

- Ebrahimi G, Sliker A (1981) Measurement of shear modulus in wood by a tension test. *Wood Science* 13(3)171-176
- Liu JY (2002) Analysis of off-axis tension test of wood specimens. *Wood and Fiber Science*, 34(2), 2002, pp. 205-211
- Liu JY, Ross RJ (2005) Relationship between radial compressive modulus of elasticity and shear modulus of wood. *Wood and Fiber Science*, 37(2), 2005, pp. 201-206
- Pierron F, Vautrin A (1994) Accurate comparative determination of the in-plane shear modulus of T300/914 by the Iosipescu and 45° off axis tests. *Composites Science and technology*, 52, 61-72
- Pindera MJ, Herakovich CT (1986) Shear characterization of unidirectional composites with the off-axis tension test
- Sliker A, Yu Y (1993) Elastic constants for hardwoods measured from plate and tension tests. *Wood and Fiber Science*, 25(1), 1993, pp. 8-22
- Szalai J (1994) A faanyag és faalapú anyagok anizotrop rugalmasság- és szilárdságtana – Hillebrand Nyomda
- Yoshihara H, Ohta M (2000) Estimation of the shear strength of wood by uniaxial-tension test of off-axis specimens. *J Wood Sci* (2000) 46:159-163
- Zhang W, Sliker A (1991) Measuring shear moduli in wood with small tension and compression samples. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 1991, pp. 58-68